
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Realizace a měření H-můstku jako zdroje signálu pro piezomotorky

Implementation and Measurement of an H-Bridge as a Source of a Signal for Piezomotors

Bakalářská práce

Autor:

Michal Semínko

Vedoucí BP práce:

Ing. Martin Černík. Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Pavel Rydlo

V Liberci 18. 05. 2007

Zadani

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat především vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Černíkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a pomoc při zpracování této bakalářské práce.

Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

Abstrakt

Bakalářské práce se zabývá realizací a měřením H – můstku jako zdroje signálu pro piezomotorky. V teoretické části je popsána problematika piezomotorků jeho napájení a využití. Dále je zde popsán princip činnosti střídačů. A zde popsán vliv PWM na můstek.

V praktické části je uveden návrh a realizace napájecího zdroje. Návrh střídačů a jejich využití v obvodu. Na přípravku bylo provedeno měření průběhů signálu na náhradní zátěži. V závěru jsou naměřené a spočtené hodnoty vyhodnoceny a zpracovány graficky.

Klíčová slova: Piezoelektrické motory, střídače

Abstract

The bachelor project deals with the implementation and measurement of an H – bridge as a source of a signal of piezomotors. In the theoretical part there is a description of the problems of piezomotors, power supplies and usage. Next there is a description of the principles of the operations of switches. An influence of PWM on the bridge is described, too.

In the practical part there is a suggestion and implementation of the power source. A suggestion of switches and their usage in the circuit. Measuring of the process of the signal was performed on the preparation with a spare load. In the conclusion there are measured and calculated values evaluated and graphically proceeded.

Keywords: piezoelectric motors, switches

Obsah

Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Abstrakt.....	6
Obsah.....	7
Seznam použitých značek a symbolů.....	9
Úvod.....	11
1 Teoretická část.....	3
1.1 Piezoelektrické motory	3
1.2 Proudový střídač	2
1.2.1 Princip činnosti proudového spínače	2
1.3 Napět'ový střídač.....	4
1.3.1 Princip činnosti napět'ového střídače.....	4
1.4 Pulsní šířková modulace PWM	2
1.4.1 PWM pro řízení pulsních měničů	2
1.5 Princip činnosti IR 2112	10
1.6 Obvody pro napájení piezomotorků a piezoaktuátorů	11
1.6.1 Pomocný napájecí zdroj.....	12
2 Praktická část.....	2
2.1 Návrh napájecího zdroje	2
2.2 Návrh střídače	2
2.3 Metoda měření	4
2.3.1 Měření na náhradním zátěži.....	4
2.3.2 Ukázka průběhů získaných z osciloskopu	5
3 Závěr.....	50
4 Seznam použité literatury.....	51
5 Seznam obrázků.....	52
6 Seznam tabulek.....	53

Seznam použitých značek a symbolů

Zkratky	Popis	Jednotka
A_L	konstanta jádra	[H/závit]
f	frekvence	[Hz]
f_N	nosná frekvence	[Hz]
f_M	modulační frekvence	[Hz]
C	kondenzátor	[F]
D	dioda	[V]
i_{max}	maximální proud	[A]
i_z	proud zátěží	[A]
KL	kombinační logika	[-]
$K1$	komparátor	[-]
L	indukčnost	[H]
n	počet závitů	[-]
P	činný výkon	[W]
PWM	pulsní šířková modulace	[-]
$R1$	zatěžovací odpor	[Ω]
$R14$	potenciometr	[Ω]
SL	sekvenční logika	[-]
$S_{1,2,3,4}$	spínače (tranzistory)	[-]
u_1	střídavé napětí	[V]
u_z	elastické posunutí	[-]
T	perioda	[s]
t	čas	[s]
t_0	ochranná doba	[s]
U_{CM}	změřené napětí na kondenzátoru	[V]
U_{CS}	spočtené napětí na kondenzátoru	[V]
U_d	bipolární napětí	[V]
U_r	napětí na odporu	[V]
U_{VST}	vstupní napětí	[V]
U_M	maximální napětí	[V]

λ	vlnová délka	[-]
ω	úhlová frekvence	[Hz]

Úvod

Cílem této bakalářské práce je realizace a měření H – můstku, jako budiče pro piezoelektrické motory. Jelikož piezoelektrické motory mají kapacitní charakter, vyžadují nutnost použití speciálních budících obvodů. Proto se tedy bakalářská práce věnuje, po konzultaci s vedoucím práce, realizaci budiče s proudovým režimem. Nedílnou součástí práce je návrh a spočtení zhotovení dvou cívek pro realizaci proudového střídače. Proudové střídače se mimo jiné používají pro pohony kompresorů či indukční ohřevy.

Dalším cílem bakalářské práce je realizace napájecího zdroje stabilizovaného napětí. Zdroj by měl být regulovaný v rozsahu 80-220 V a předpokládá se jeho použití, ve spojení s můstkovým budičem, právě k napájení piezoelektrických motorů. Pro funkčnost tohoto buzení je nezbytně nutné napájení budičů můstku. Z toho důvodu musí být součástí ještě pomocný napájecí zdroj. Jde o klasický zdroj sestavený z transformátoru, usměrňovače, stabilizátorů a několika kondenzátory pro vyhlazení a filtraci výstupních napětí. Pro budiče můstku je potřeba symetrické napájení vůči zemi a je zvoleno napětí +12 V a -12 V.

V závěru budou shrnuty výsledky buzení piezomotorku a také budou porovnány hodnoty spočtených a naměřených veličin na náhradní zátěži.

1 Teoretická část

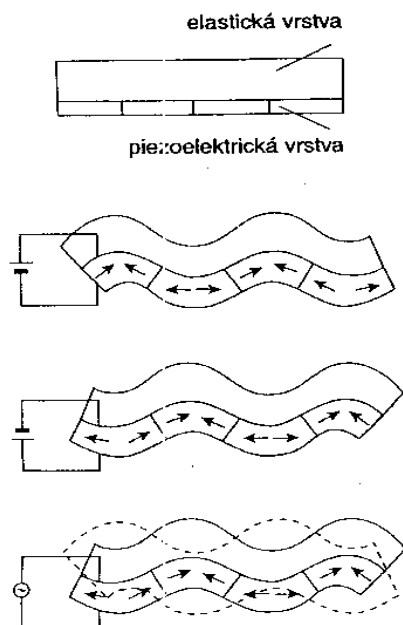
1.1 Piezoelektrické motory

V současné době mnoho firem a výzkumných pracovišť pracuje na vývoji nových motorů využívajících nepřímý piezoelektrický jev.

Podstatou funkce piezoelektrických motorů je vyvolání deformace povrchové vrstvy statoru, která se v rozmanitém konstrukčním provedení motoru převádí na rotační pohyb rotoru.

1.1.1 Princip piezoelektrického motoru s postupnou vlnou

Pro bližší popis funkce je vybrán piezoelektrický motor s postupnou vlnou. K vyvolání postupné vlny je několik. Jedna z nich je, že máme piezoelektrickou vrstvu, v které se střídají opačně polarizované úseky. Při přiložení stejnosměrného napětí mezi elektrody nastane deformace piezoelektrické vrstvy. Předpokládejme, že úseky, které jsou polarizovány v jednom smyslu, zvětší svojí tloušťku, zatímco úseky polarizované opačně se zeslabí. Spojíme-li pevně s piezoelektrickým prvkem elastickou vrstvu, nastane při přiložení stejnosměrného napětí sinusové prohnutí elastické vrstvy podle obrázku č. 1. Při přiložení střídavého napětí vznikne stojatá vlna.



Obr. 1. Deformace vlivem přiloženého napětí [3]

V elastické vrstvě se vybudí stacionární ohybové deformace. Spojíme-li dvě piezoelektrické vrstvy se střídajícími se úseky opačné polarizace podle obrázku č. 2, kde délka úseku je $\lambda/2$ tak, že mezi úseky jedné a druhé vrstvy bude posuv o polovinu délky úseku. To je $\lambda/4$, dostaneme piezoelektrický měnič, který je schopen generovat postupnou povrchovou elastickou vlnu.



Obr. 2. Struktura piezoelektrického měniče [3]

Přiloží-li na elektrodu 1 střídavé napětí

$$u_1(t) = U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1.1)$$

s vhodně voleným kmitočtem, jehož vlnová délka odpovídá délce dvou úseků, vybudí piezoelektrický prvek pod elektrodou 1 stojaté vlny. Zvolíme-li orientaci piezoelektrického měniče tak, že osa z bude kolmá k povrchu měniče, lze elastické posunutí povrchového bodu A piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 1 ve směru osy z popsat rovnicí

$$u_z = U \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1.2)$$

kde

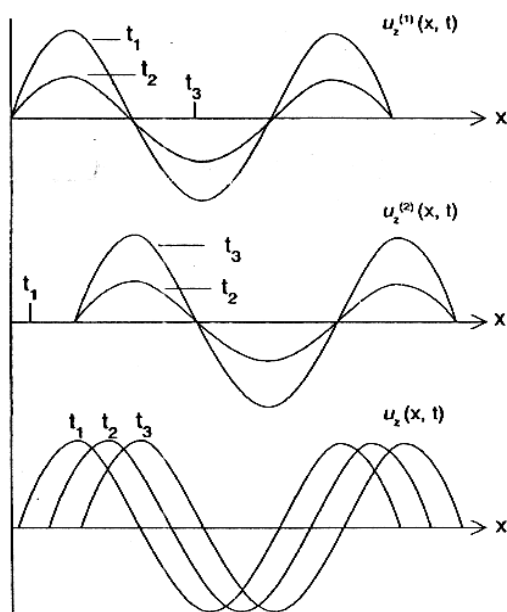
U je maximální rozkmit povrchového bodu, který je závislý na velikosti napětí U_1 ,
 v rychlost šíření postupné elastické vlny ve směru x ,
 $k = \omega/v$ vlnové číslo.[3]

Přiložíme-li na elektrodu 2 střídavé napětí $u_2 = -U \cdot \cos(\omega \cdot t)$ vybudí piezoelektrický prvek pod elektrodou 2 také stojaté vlny. Elastické posunutí povrchového bodu B piezoelektrické vrstvy pod elektrodou 2 ve směru osy z bude

$$u_z^{(2)} = U \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (1.3)$$

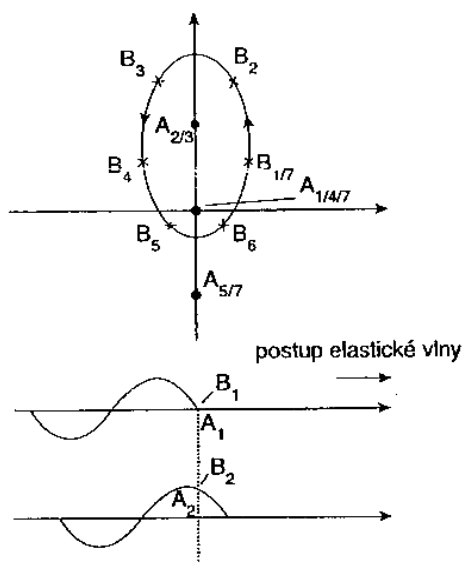
Fázový posuv mezi jednotlivými průběhy ohybové deformace je $\lambda/4$. Složením obou posunutí získáme výsledné elastické posunutí $u_z(x,t)$, které má charakter postupné elastické vlny postupující ve směru osy x na obrázku 3. [3]

$$u_z(x,t) = u_z^{(1)} + u_z^{(2)} = U \cos[k \cdot (x - v \cdot t)] \quad (1.4)$$



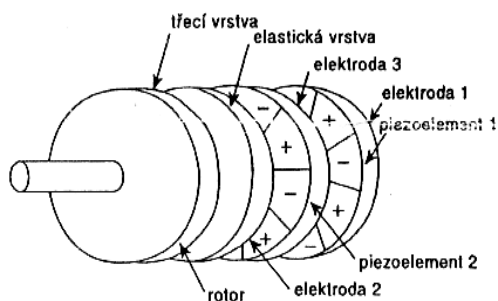
Obr. 3. Zobrazení vzniku postupné elastické vlny [3]

Pro unášení rotoru motoru postupnou elastickou vlnou, která se šíří na povrchu statoru, je nezbytné, aby povrchové částice statoru vykonávaly eliptický pohyb v rovině tvořené směrem šíření elastické vlny a normálou k povrchu statoru. Stator motoru je tvořen piezoelektrickou vrstvou, na které jsou na vhodných místech umístěny elektrody, a elastickou vrstvou pevně spojenou s piezoelektrickým prvkem. Na obrázku č. 4 je znázorněn pohyb bodu A, který je na povrchu piezoelektrického a který vykonává pouze vertikální pohyb, a bodu B, který je na povrchu elastické vrstvy a který již vykonává požadovaný eliptický pohyb.



Obr. 4. Znázornění vzniku eliptického pohybu bodu B na povrchu elastické vrstvy [3]

Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru používaného v praxi, který pracuje na uvedeném principu, je na obrázku č. 5.

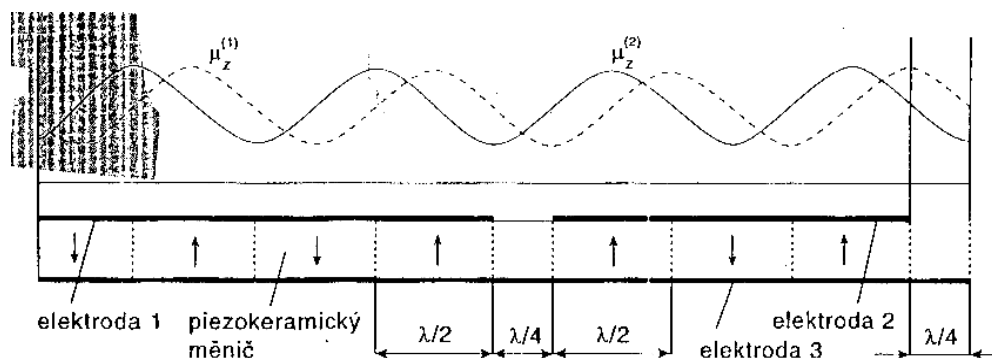


Obr. 5. Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru [3]

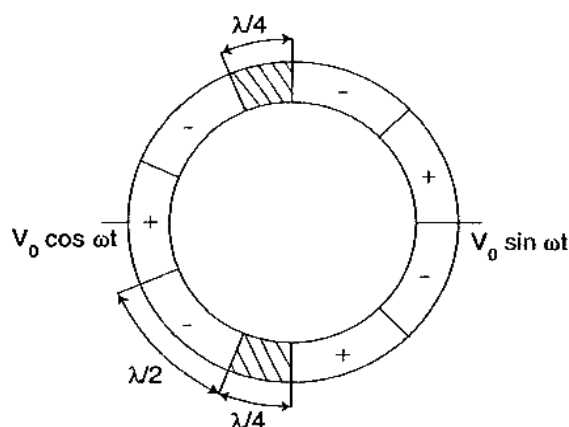
Motor se skládá z rotoru a statoru, které mají tvar prstenců a jsou k sobě přitlačovány určitou axiální silou. Kmitání statoru zajišťuje piezoelektrická vrstva, která je opatřena elastickou vrstvou. Povrch rotoru je opatřen třecí vrstvou, která zajišťuje definovaný koeficient tření mezi elastickou vrstvou statoru a rotorem. Je-li piezoelektrický měnič složen ze dvou systémů, a jsou-li vlastní kmity piezoelektrického měniče a budícího signálu vzájemně vyladěny, vzniká postupná elastická vlna, která unáší rotor určitou rychlostí. Každý bod na povrchu elastické vrstvy se při průchodu postupné vlny pohybuje po elipse, což je charakteristické pro ohybové kmity. Doba oběhu elipsy

odpovídá době periody elektrického buzení. Rychlost pohybu na eliptické dráze je tedy určována budicí frekvencí (desítky kilohertzů) a zdvihem (jednotky milimetrů). Rotor se tedy během jedné periody budicího signálu pootočí o jeden obvod elipsy. Piezoelektrický měnič a indukčnost budicího elektrického obvodu představují rezonanční obvod naladěný na vlastní frekvenci statoru. Maximální otáčky rotoru leží v blízkosti vrcholu rezonanční křivky.

Další způsob vytvoření postupné elastické vlny spočívá v použití pouze jedné piezoelektrické vrstvy, v níž se střídají opačně polarizované úseky. Délka úseku je rovna $\lambda/2$. S touto piezoelektrickou vrstvou je pevně spojena elastická vrstva. Systém elektrod je vytvořen tak, aby mezi elektrodou 1 a 2 byla vzdálenost délky poloviny úseku (tj. $\lambda/4$), zobrazeném na obr. 6 a na obr. 7.[3]

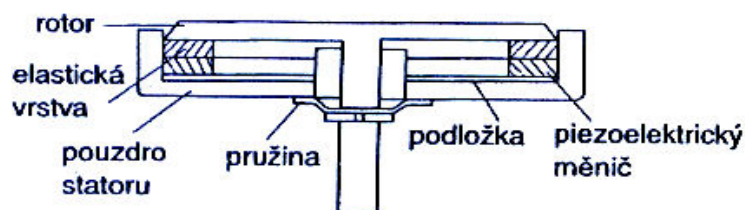


Obr. 6. Rozvinutý prstenec statoru piezoelektrického motoru [3]



Obr. 7. Prsten statoru piezoelektrického motoru [3]

Přiložíme-li elektrody jednotlivých piezoelektrických měničů napětí s harmonickým průběhem vzájemně posunutým o 90° , budou rozkmitány jednotlivé měniče stojatými kmity. Působením dvou budících systémů navzájem prostorově (o $\lambda/4$) a časově (o $T/4$) posunutých stojatých vln ohybových kmitů dostaneme v elastické vrstvě postupnou povrchovou elastickou vlnu. Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru v praxi, který pracuje na uvedené m principu znázorněné na obr. 8.



Obr. 8. Konstrukční uspořádání piezoelektrického motoru [3]

1.1.2 Praktické využití piezoelektrických motorů

V praxi je motorek využíván například ve firmě Canon, která tyto motorky využívá do svých fotoaparátů. Další, kde se běžně setkáváme s piezomotorky jsou bankomaty. A to v oblasti kam strkáme bankovní kartu, kde jsou dva piezomotorky naproti sobě a danou kartu zasouvají či vysouvají.

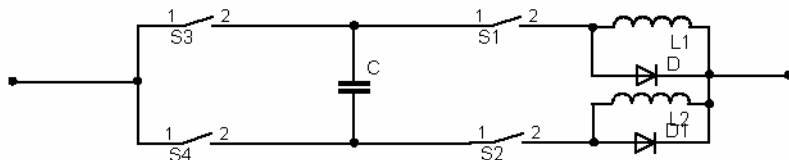
1.1.3 Napájecí obvody

Pokud se řeší napájení piezoelektrických motorů, chovají se dielektrické vrstvy jako kondenzátor (řádově 10^{-8} až 10^{-7} nF). Stejným způsobem se napájejí také piezoaktuátory, které mohou realizovat lineární pohyb o délce 0,1 až 1 mm. Typické napájecí napětí se pohybuje kolem 200 V. S těmito vlastnostmi se musí počítat při konstrukci napájecích obvodů. Jde vlastně o to, že se jedná o zdroj, který má relativně vysoké napětí. Při prudkých změnách polohy musí zdroj poskytnout větší proud.

Zajímavé se může stát použití PWM.

1.2 Proudový střídač

Prvním záměrem této bakalářské práce bylo vytvořit proudový zdroj. Na obrázku č. 9 je zjednodušené schéma proudového zdroje s cívkami.



Obr. 9. Proudový zdroj

Proudový střídač je napájen ze zdroje konstantního proudu. Proto je charakteristickou součástí velká tlumivka ve stejnosměrném obvodu, která zabezpečuje vyhlazení proudu. Součástky proudových střídačů musí vydržet napětí způsobená přerušováním proudu v indukčnosti zátěže. Proudové střídače se dnes používají zřídka, a to zejména pro pohony velkých výkonů.

Proudové střídače se dnes už moc nevyužívají nahrazují je Napěťové střídače. Využití proudových střídačů je zejména pro pohony velkých výkonů, jako například: kompresory, rozběhy soustrojí v přečerpávacích elektrárnách, pro indukční ohřevy.

1.2.1 Princip činnosti proudového spínače

Střídače proudu vytvářejí průběh výstupního proudu, avšak průběh napětí záleží na charakteru zátěže. Stejnosměrný zdroj proudových střídačů má charakter zdroje proudu. Často je používán řízený usměrňovač. Na vstupu střídače je zapojena tlumivka s velkou indukčností L . Tlumivka je schopna v intervalech srovnatelných s několika takty udržet v obvodu konstantní proud. Současně tato tlumivka slouží jako filtr vyšších harmonických proudů.[1]

V našem případě se cívka spočítá takto.

Pro dané hodnoty frekvence a kapacity $f = 100 \text{ kHz}$, $C = 100 \text{ nF}$

Ze vzorce: $f = 1/(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}) \text{ Hz}$ (1.5)

Snadnou úpravou :

$$L = 1/(4 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot f^2) \text{ H} \quad (1.6)$$

$$L = 25 \text{ } \mu\text{H}$$

Optimální hodnota cívky by měla být 10 krát až 100 krát větší, proto nakonec byla zvolena hodnoty cívky 3 mH.

Cívka byla navinuta do hrníčkového jádra 13/8, materiálu H 12, $A_L = 100 \text{ nH/závit}$.

Počet závitů n se tedy rovnal vztahu:

$$n = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (1.7)$$

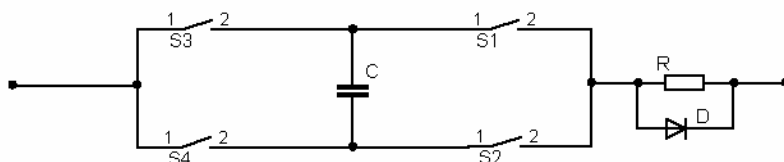
Po dosazení se počet závitů rovná:

$$n = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-9}}} = 173$$

Tyto údaje byly použity při výrobě cívek, využité při realizaci proudového zdroje.

Základní schémata proudových střídačů jsou v principu stejná jako u apťových, odpadá zde nutnost instalace nulových diod.

V rámci vytvoření proudového zdroje bylo vyzkoušeno ještě jedno zapojení s odporem a diodou na obrázku č. 10.



Obr. 10. Proudový zdroj

Jelikož se zjistilo, že budiče mosfetů IR 2112 nejsou vhodné pro toto řízení. Ustoupilo se od prvotního záměru a pokračovalo se v napěťovém řízení.

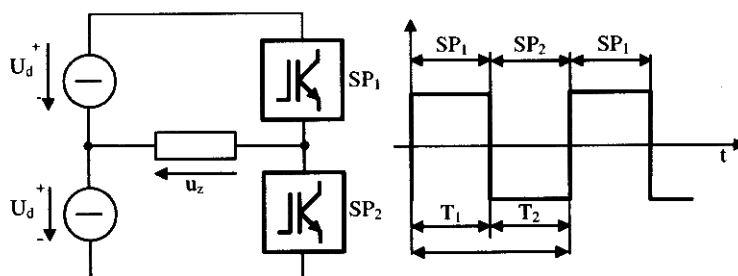
1.3 Napěťový střídač

Napěťový střídač je napájen zdrojem s malou vnitřní impedancí. Napětí může být konstantní nebo regulované. Charakteristickou součástí stejnosměrného napájecího zdroje bývá velký kondenzátor, jako zdroj špičkové energie. Energetickým zdrojem bývá nejčastěji usměrňovač napájený ze střídavé sítě. Napěťové střídače dnes představují většinu střídačů v elektrických regulovaných střídavých pohonech.

1.3.1 Princip činnosti napěťového střídače

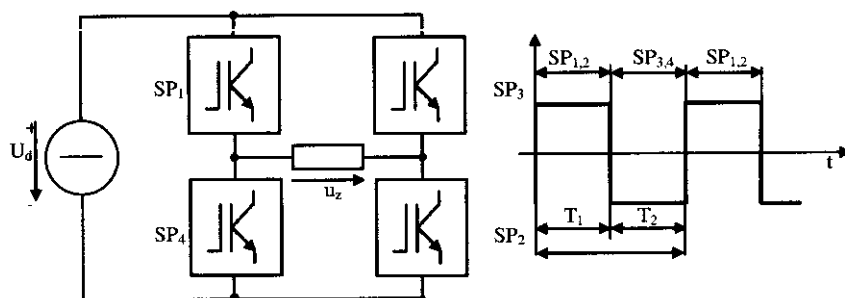
Střídač si lze představit jako soubor spínačů, které střídavě připojují k zátěži kladný nebo záporný pól stejnosměrného zdroje. Frekvence spínání pak určuje výstupní frekvenci střídače. [1]

Ukázka zapojení střídače v jednofázovém polomůstkovém spojení na obrázku č. 11.



Obr. 11. Zapojení střídače v jednofázovém polomůstkovém spojení [1]

U jedno fázového polomůstkového spojení je k činnosti dvou zdrojů napětí jsou výhodou pouze dva spínače. Nejběžnější je ovšem jednofázové můstkové spojení na obrázku č. 12, využívané pro výkonové aplikace.



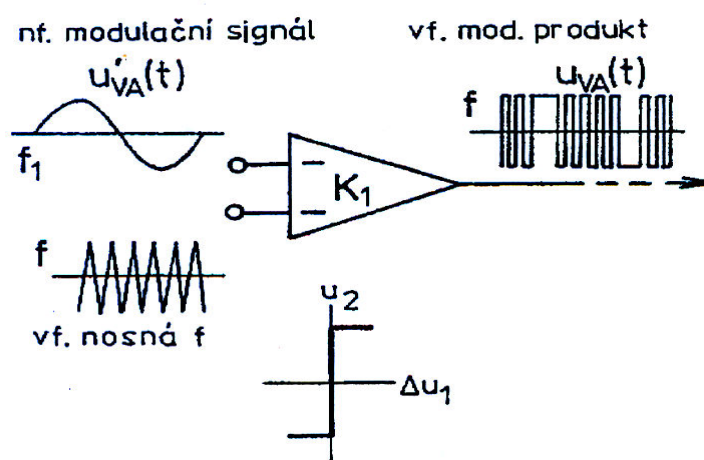
u_z - napětí na zátěži

Obr. 12. Jednofázové můstkové spojení[1]

1.4 Pulsní šířková modulace PWM

1.4.1 PWM pro řízení pulsních měničů

Principiálně nejjednodušší a nutno zdůraznit, že současně i nejkvalitnější pulsní šířkový modulátor je na obrázku č. 13.



Obr. 13. Komparátor [4]

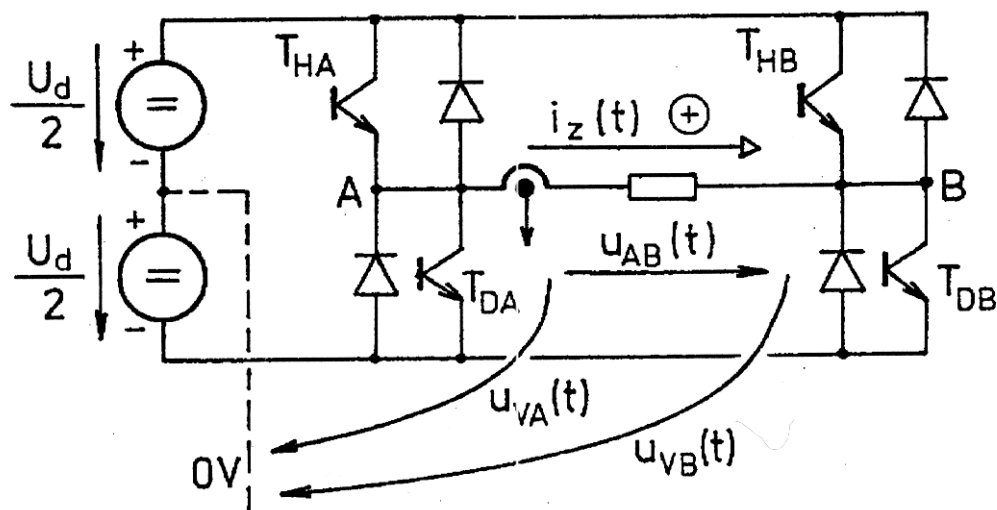
Je jím komparátor. V našem případě komparátor LM319. Který je pečlivě vybrán, aby byl dostatečně rychlý pro funkčnost daného můstku.

Přijmeme-li radiotechnickou terminologii, pak na jeden vstup komparátoru přivádíme vysokofrekvenční trojúhelníkový nosný signál o kmitočtu f , na druhý vstup přivádíme nízkofrekvenční modulační signál, z výstupu odebíráme vysokofrekvenční modulační produkt v podobě pulsního šířkově modulovaného obdélníkového signálu.

Řízení čtyřkvadrantových ss.pulsních měničů

Řídicí systém k tomuto můstku je zobrazen na obrázku č.15, který lze charakterizovat jako bipolární řízení – spínání obou tranzistorů ve větvi. To znamená, že nemusí být identifikován směr proudu, protože tranzistory ve větvi jsou preventivně zapínány bez ohledu na aktuální směr proudu.

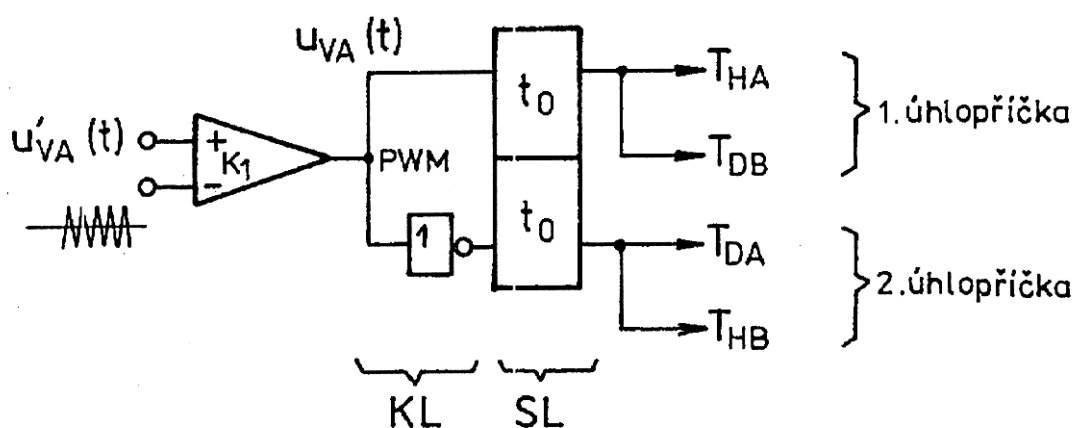
Na obrázku č. 14. je nakreslen čtyřkvadrantový celý můstek.



u_{VA} – napětí na větvi A

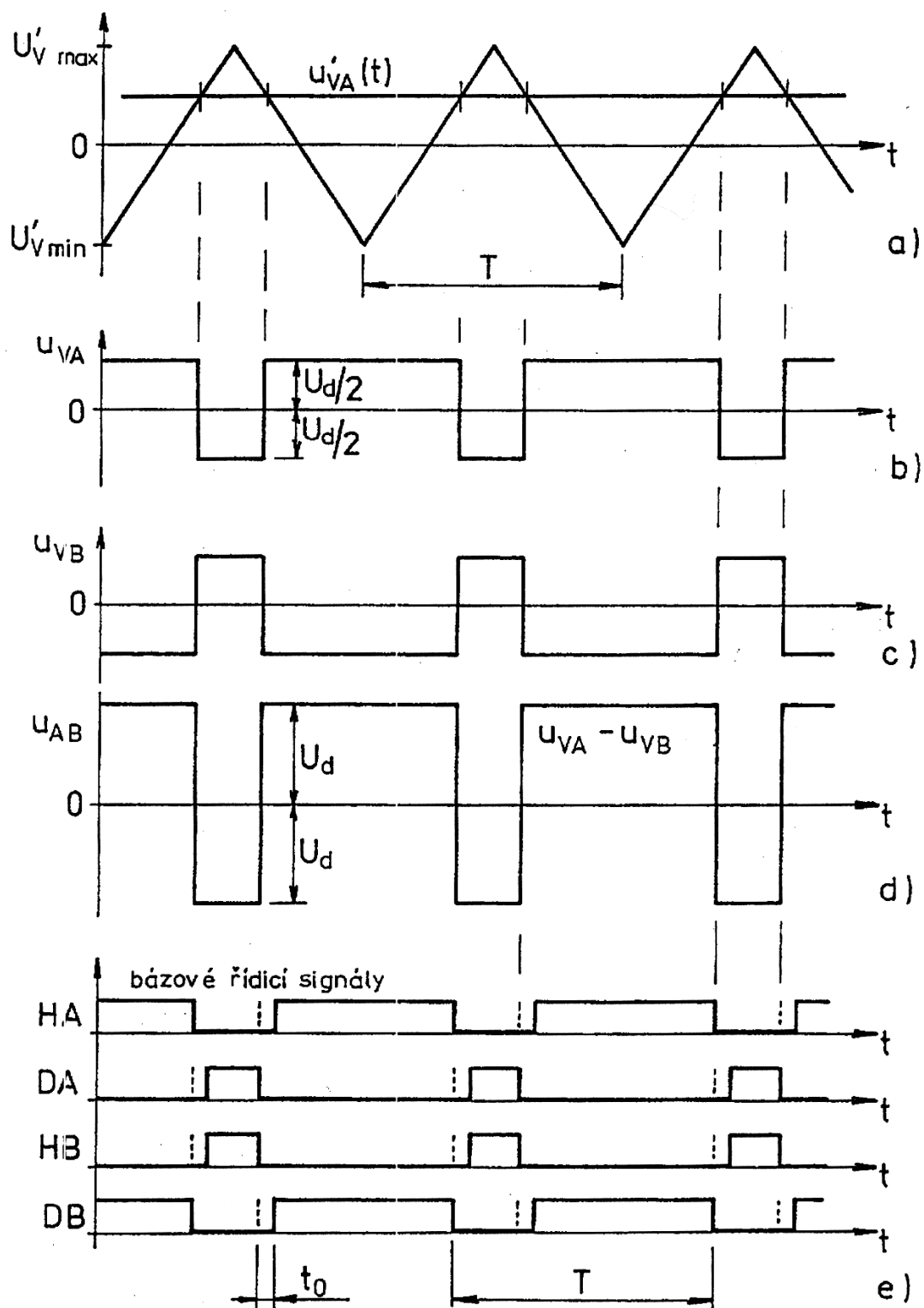
u_{VB} – napětí na větvi B

Obr. 14. Čtyřkvadrantový celý můstek [4]



Obr. 15. Řídicí systém ke čtyřkvadrantovému můstku [4]

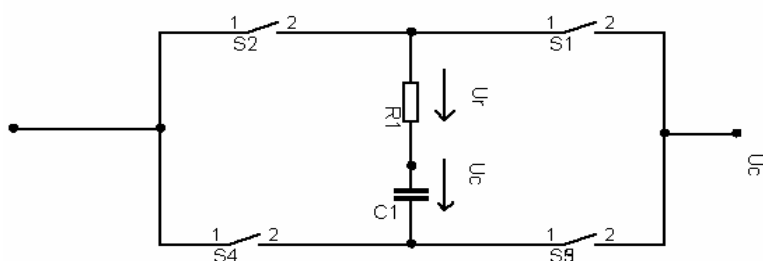
Mezi výstupem z komparátoru a řídícími elektrodami tranzistorů se nachází blok kombinační logiky KL a blok sekvenční logiky SL. Úkolem sekvenční logiky je zajistit časovou prodlevu t_0 (což je ochranná doba) mezi vypnutím jedné a zapnutím druhé větve. Ochranná doba t_0 musí být s rezervou větší než celková vypínací doba použitých tranzistorů. Velikost doby t_0 závisí na typu použitých tranzistorů, na aplikaci, na výkonu a pohybuje se typicky od $1\mu\text{s}$ u MOS-FETU; $2\mu\text{s}$ u IGBT, $5\mu\text{s}$ u bipolárního tranzistoru, $15\mu\text{s}$ u robustního bipolárního darlingtonu, až do $50\mu\text{s}$ u GTO.



Obr. 16. Bipolární řízení – spínání obou tranzistorů ve větvi. Průběhy napětí v celém čtyřkvadrantovém můstku. [4]

Při běžném použití H – můstku se můstek nabíjí a vybíjí proudem. Velikost nabíjecího a vybíjecího proudu je vysoká (při sepnutí tranzistorů se blíží k zkratovému proudu). Při vysokých frekvencích je potom hodnota středního proudu (roste lineárně s frekvencí) vysoká. Proto je nutné daný proud omezovat. Omezit proud je možné pomocí proudového střídače (jak už bylo řečeno v kapitole proudový střídač) nebo zařazením odporu k zátěži, který je na obrázku č. 17.

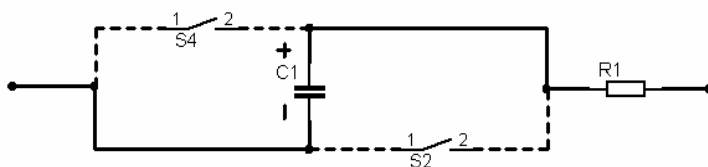
Charakter výsledného odporu se blíží k integračnímu članku, který potlačuje vysoké frekvence.



Obr. 17. H – můstek se zařazeným odporem k zátěži

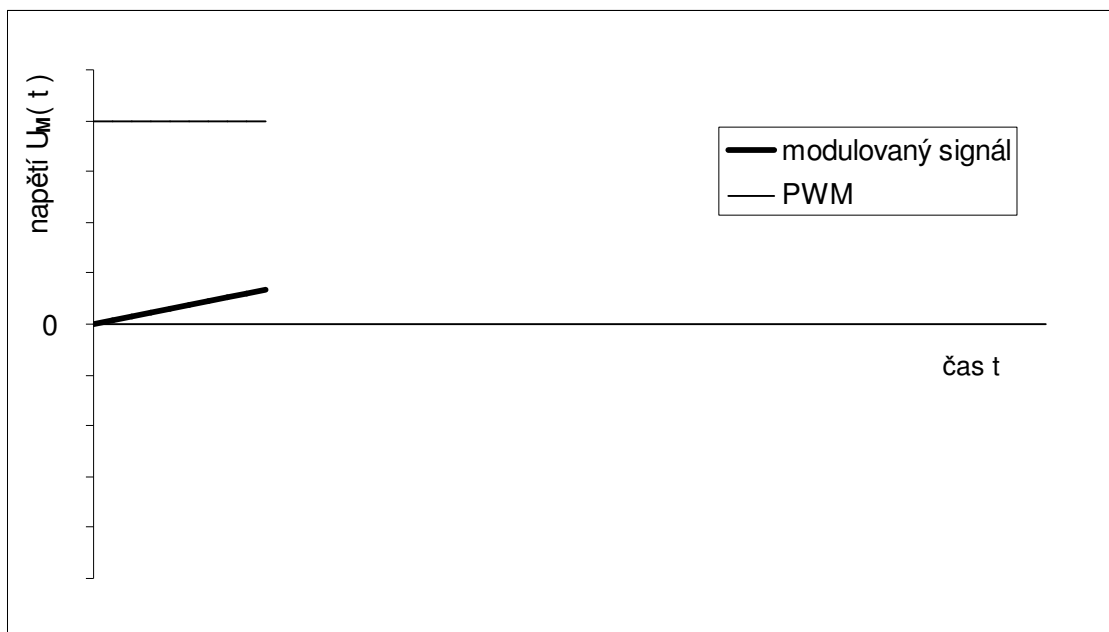
1.4.2 Simulace signálu

Ukázka namodelovaného signálu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Na zjednodušeném obrázku č. 18 je ukázka namodelovaného signálu při sepnutí tranzistorů 1 a 3, které jsou na obrázku č.19, znázorněny silnou čarou.



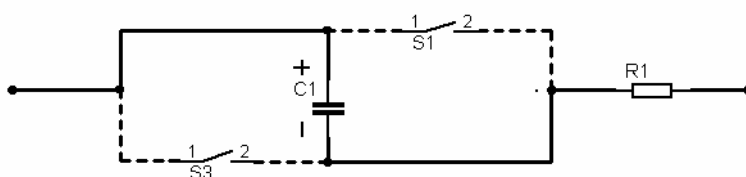
Obr. 19. Můstek se sepnutými tranzistory 1 a 3

$$(U_1 + U_M) \cdot e^{\frac{-t}{RC}} - U_M \quad (1.8)$$



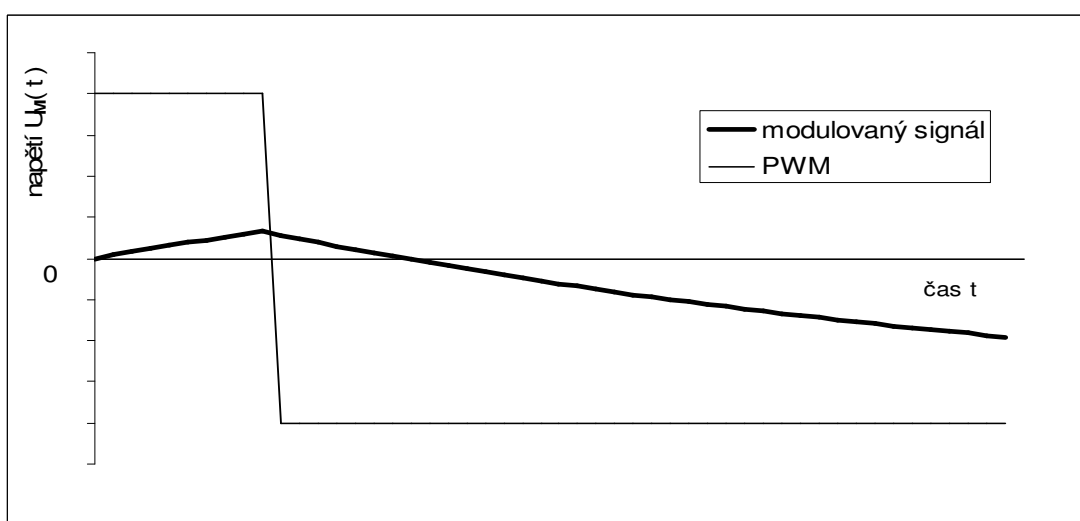
Obr. 18. Namodelovaný signál nabíjecího kondenzátoru

Na obrázku č.20 jsou sepnuty tranzistory 2 a 4, které jsou opět znázorněny silnou čarou.



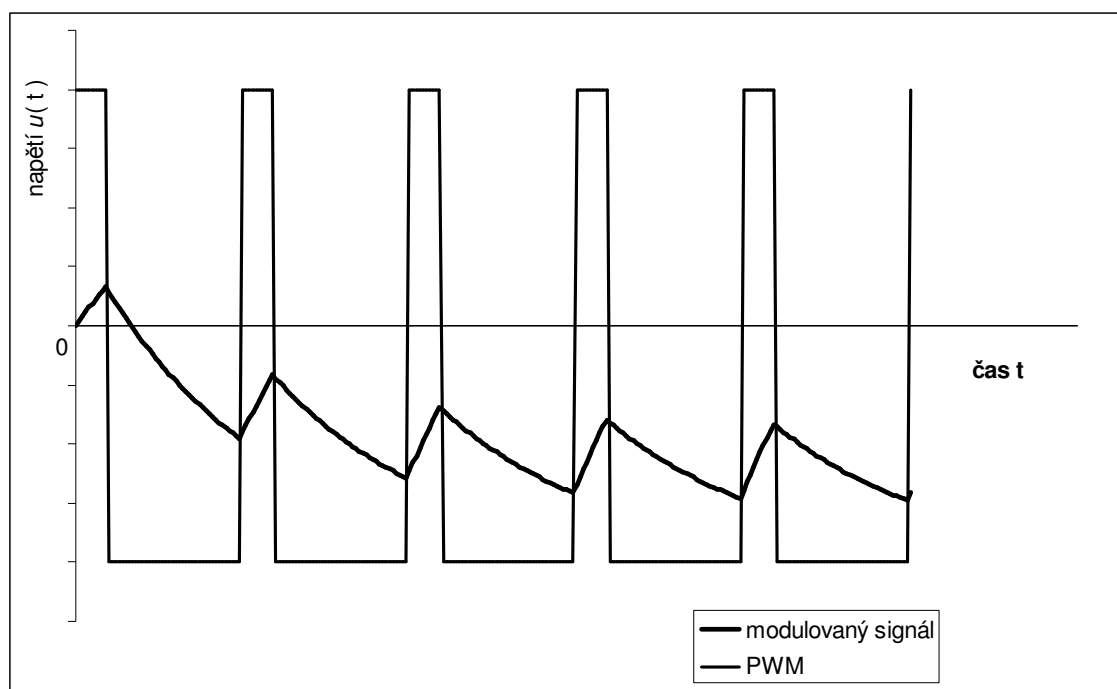
Obr. 20 Můstek se sepnutými tranzistory 2 a 4

$$(U_1 + U_M) \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} - U_M \quad (1.9)$$



Obr. 21. Namodelovaný signál vybíjecího se kondenzátoru

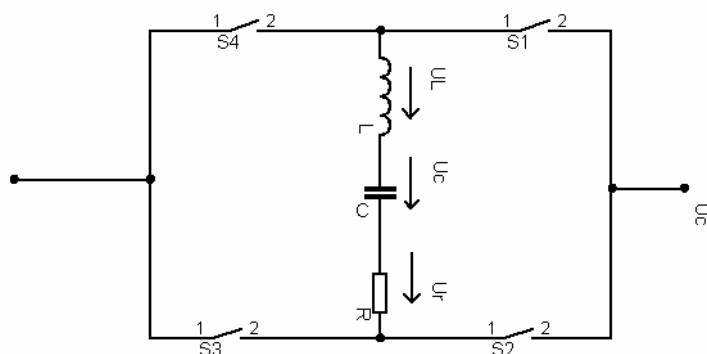
Namodelovaný signál při několika nabitích a vybitích kondenzátoru je na obrázku č. 22.



Obr. 22 PWM s namodelovaným signálem

Vhodnější je zařazení místo odporu použití rezonančního střídače. Jak je zobrazeno na obrázku č. 23.

Bohužel s rezonančním střídačem klesá využití rozsahu modulační frekvence.



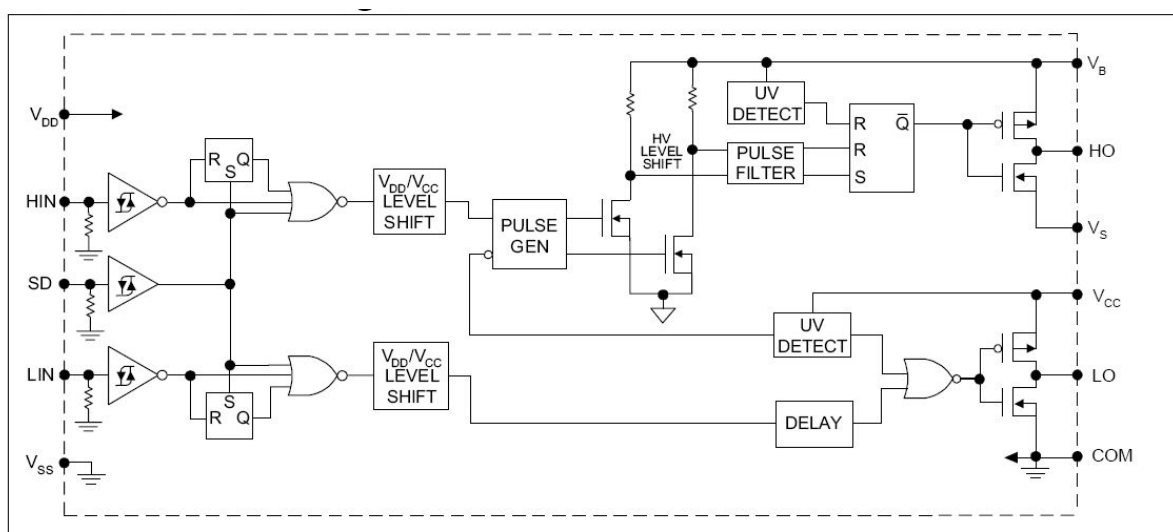
Obr. 23 Rezonanční střídač

Analogovou přístrojovou realizaci šířkového modulátoru, tedy analogový komparátor lze napodobit v čistě digitální podobě. Pak digitální komparátor(kombinační logický obvod) bude porovnávat velikost dvou binárních čísel a jeho jednobitový výstup bude říkat, které z obou čísel je větší. Jedno číslo bude obrazem nf. Modulačního signálu, druhé číslo bude mít význam vf. nosného symetrického trojúhelníku. Proto bude generováno vratným čítačem. Počet bitů vratného čítače a tedy i nf. signálu a komparátoru musí být z hlediska přesnosti pro ss. pohony asi 8 bitů, pro střídavé pohony se sinusovou PWM alespoň 10 bitů. Nevhodné jsou například nevratný čítač, který je obdobou nesymetrické pily. (V současnosti se tyto obvody realizují pomocí programovatelných hradlových polí.)

1.5 Princip činnosti IR 2112

IR 2112 zajišťuje výkonové buzení tranzistorů MOSFET a IGBT, které jsou zapojeny v jedné polovině H – můstku. Blokové schéma IR2112 se jednoduše rozděluje na dvě části na horní a dolní větev. V dolní větvi LIN je zjednodušené blokové zapojení pro buzení tranzistoru. Jediné co stojí za zmínění je blok DELAY neboli vyrovnávač zpoždění. To proto, že horní větev je složitější a signál jím neprojde tak rychle jako u dolní větve. Horní větev HIN, jak už bylo uvedeno je složitější. Její funkce je plovoucí buzení tranzistoru. Proto je v obvodu blok Level Shift, který je schopen i přes to, že tranzistor napěťově plave, řídit tranzistor..

Díky přizpůsobení logických úrovní se nemusí IR 2112 starat o sepnutí při změně napětí. To znamená, že když se přivede napětí menší jak napájení IR 2112 tak budič neví jestli se má sepnout. Proto je prvek přizpůsobení logických úrovní, který zapíná budič při poklesu napětí.



Obr. 24. Blokové schéma IR 2112

1.6 Obvody pro napájení piezomotorků a piezoaktuátorů

Napájecí zdroje jsou v dnešní době nedílnou součástí každého elektronického zařízení. Asi nejjednodušším napájecím zdrojem jsou akumulátory, jejich nevýhodou je omezená životnost, nemožnost regulace proudu či napětí. Kromě toho mají také danou kapacitu, od níž se odvíjí i jejich rozměrová velikost. Jsou vhodné pro zařízení, kde není potřeba měnit parametry napájení a kde jsou malé proudové odběry. Pro většinu aplikací jsou nedostatečné, zejména pak pro laboratorní účely, kde je potřeba zdrojů, které je možno nastavovat jak z hlediska výstupních proudů, tak z hlediska velikosti výstupních napětí. Pro trvalejší napájení elektrických zařízení je možné využít jednoduchých transformátorových zdrojů, které se skládají z transformátoru, usměrňovače a stabilizátoru. Jejich nevýhodou jsou rozměry transformátoru pro větší výkony zdroje. Stabilizátory je pak možné volit jak s pevnou tak i s nastavitelnou hodnotou výstupního napětí. Zdroje je možno dále rozdělit na lineární napájecí zdroje a na spínané zdroje. Do lineárních zdrojů se řadí i již zmíněné transformátorové zdroje. Lineárními se nazývají proto, že jejich zatěžovací charakteristika má lineární průběh. Z konstrukčního hlediska se lineární zdroje oproti spínaným jeví jako jednodušší. Lineární zdroje jsou dále popsány v následující kapitole. Spínané zdroje se skládají z usměrňovače, kterým je usměrněno síťové napětí a vzápětí také usměrněné napětí vyhlazeno pomocí filtru. Za filtrem je umístěn spínací tranzistor, u kterého je kladen důraz na velkou rychlost spínání. Spínání tranzistoru je řízeno řídicím obvodem, jehož základem může být pulsní šířková modulace (PWM). Spínání tranzistoru je velmi rychlé (10 až 100 kHz). Napětí s touto frekvencí je následovně upraveno na požadovanou hodnotu výstupního napětí pomocí transformátoru, který již není takových velikostí jako by museli být pro standardní síťový kmitočet 50 Hz. Poté musí být opět napětí usměrněno a vyfiltrováno pomocí výstupního filtru. Vzhledem k vysokým frekvencím výstupního napětí jsou výstupní filtry složitější oproti filtrům klasických lineárních zdrojů. Rozměry spínaných zdrojů jsou poměrně malé a energeticky úsporné, nevýhodou je však již zmíněná filtrace výstupního napětí.

1.6.1 Pomocný napájecí zdroj

Pro funkci obvodů použitých v navrženém zdroji je nezbytné jejich napájení. Z tohoto důvodu musí být součástí celého zapojení ještě pomocný napájecí zdroj. Jde o klasický zdroj sestavený z transformátoru, usměrňovače, stabilizátorů a několika kondenzátorů pro vyhlazení a filtraci výstupních napětí. Pro řídicí členy H-můstku a komparátor je potřeba napájení vůči zemi a je zvoleno napětí +12 V a -12 V.

Usměrněná napětí jsou vyhlazena kondenzátory. Velikost vyhlazených napětí je dána podle vztahu (1.10) a napětí vstupující do stabilizátoru má hodnotu přibližně 25,5 V pro 12V stabilizátor 7812 (resp. -25,5 V pro stabilizátor 7912). Maximální vstupní napětí stabilizátoru je 35 V (resp. -35 V). Vstupní napětí stabilizátoru musí být pro kladný stabilizátor minimálně o 2 V větší než je výstupní stabilizované napětí a pro záporný stabilizátor minimálně o 1,1 V menší. Hodnoty +25,5 V a -25,5 V splňují tato kritéria. Stabilizovaná napětí jsou opět filtrována kondenzátory. [3]

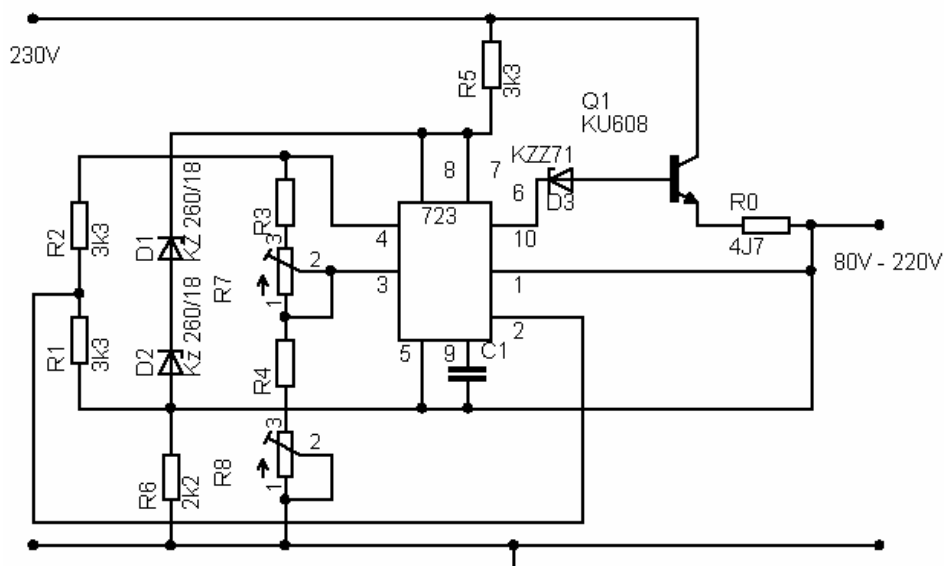
$$U_{vst} = \sqrt{2} \cdot U_{sek} \quad [V] \quad (1.10)$$

Všechny stabilizátory jsou v provedení s pouzdem TO220 a jsou opatřeny jednoduchými pasivními chladiči pro lepší odvod tepla.

2 Praktická část

2.1 Návrh napájecího zdroje

V zadání bakalářské práce je návrh napájecího zdroje pro daný H-můstek s výstupním napětím 0 až 220 V. Schéma navrhovaného zdroje s integrovaným stabilizátorem MAA 723 je na obrázku č. 25.



Obr. 25. Napájecí zdroj s integrovaným stabilizátorem MAA 723[3]

Tento zdroj napětí je navržen tak, aby uvedený H-můstek napájel v rozmezí od 80 V až 220 V. Celé toto zapojení je napájeno ze síťového napětí 230 V / 50Hz. Tímto napětím však nelze napájet integrovaný stabilizátor, který má dané maximální povolené napětí na svorkách 7 a 8, které je dané zenerovými diodami, kde na obou diodách je úbytek napětí 36 V. Tímto napětím je tedy napájen stabilizátor MAA 723. Na odporu R_6 je proti zemi námi dané nejvyšší napětí 220 V a teče jím proud:

$$I_{R_6} = U_2 / R_6 = 220/2200 = 10 \text{ mA} \quad (2.1)$$

Vzhledem k tomu, že proud integrovaného stabilizátoru MAA 723 je okolo 4 mA, teče zenerovými diodami rozdíl těchto dvou proudů, tedy cca 6 mA. Na vstup 2 stabilizátoru MAA 723 je přivedeno vydělené napětí ze svorky 4. děličem R_1 a R_2 , jejíž hodnoty jsou 3k3.

Napětí na svorce číslo 2 je tím pádem 3,58 V. Napětí na svorce 3 je získáno s odporového děliče R_3 a R_4 . Odpor R je připojen svým spodním koncem na zem napětí výstupního 220 V.

Odpor R_3 a R_4 musí být zvoleny tak, aby mezi svorkami 3 a 5 bylo opět napětí 3,58 V. Zvolíme-li proud děličem 1 mA pak vidíme, že úbytek napětí bude 220 V.

Maximální proud I_6 , který je schopen dodat MAA723 je 150 mA a při h_{21e} tranzistoru KU607

Který má hodnotu 50 lze získat na výstupu proud $I_{2max} = 7,5$ A.

Podle vzorce :

$$I_{2max} = h_{21e} \cdot I_6 = 50 \cdot 0,15 = 7,5A \quad (2.2)$$

Výstupní proud ale omezuje obvod proudového omezení uvnitř MAA723, aktivovaný napětím 0,65[V] na odporu R_0 . Maximální proud tohoto omezení tedy bude:

$$I_{2max} = 0,65 / R_0 = 0,65 / 12 = 0,054 \text{ mA} \quad (2.3)$$

Jak je z této hodnoty patrné, z hlediska proudového dojde mnohem dříve k omezení proudu odporem R_0 , než k omezení vlivu proudu I_6 . Z hlediska hodnoty tohoto proudu by jej byl schopen zabezpečit i integrovaný stabilizátor MAA 723, ale není schopen zabezpečit požadovanou velikost napájecího napětí, proto musí být užit externí tranzistor s vysokým $U_{cem} = 250$ V

Tedy pro náš daný tranzistor KU607.

Všechny hodnoty byly přepočítány k danému schématu. Jako například dodržení všech výkonů na odporech či trimrech. Jako ukázka výpočtu výkonu na odporu R_6 .

$$P_6 = U \cdot I = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2,2 \text{ W} \quad (2.4)$$

Zmiňovanou hodnotu výkonu je dána paralelní kombinací tří odporů s hodnotou $R_{1,2,3} = 68 \text{ K}\Omega$.

Což lze snadno dokázat:

$$1/R = 1/R_{1,2,3} + 1/R_{1,2,3} + 1/R_{1,2,3} \quad (2.5)$$

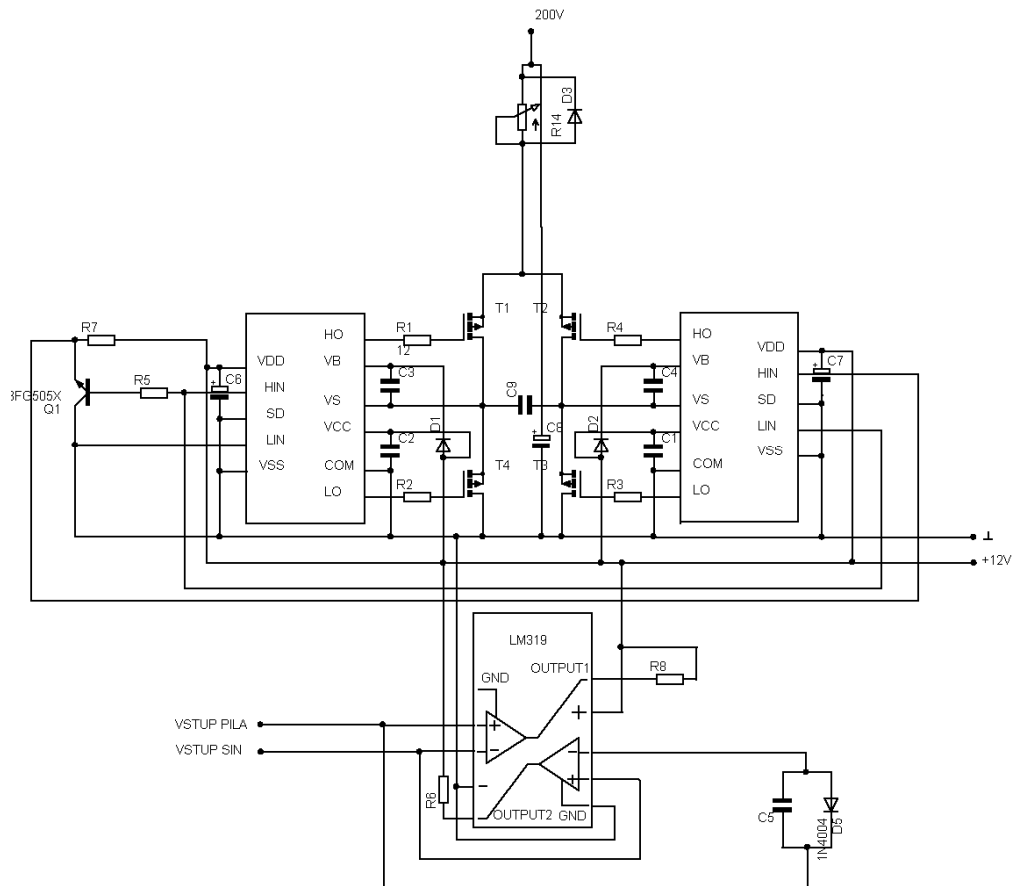
Při dosazení se $R = 22,6 \text{ k}\Omega$

Potom lze už jen zjistit jestli daný odpor vyhovuje podle vzorce:

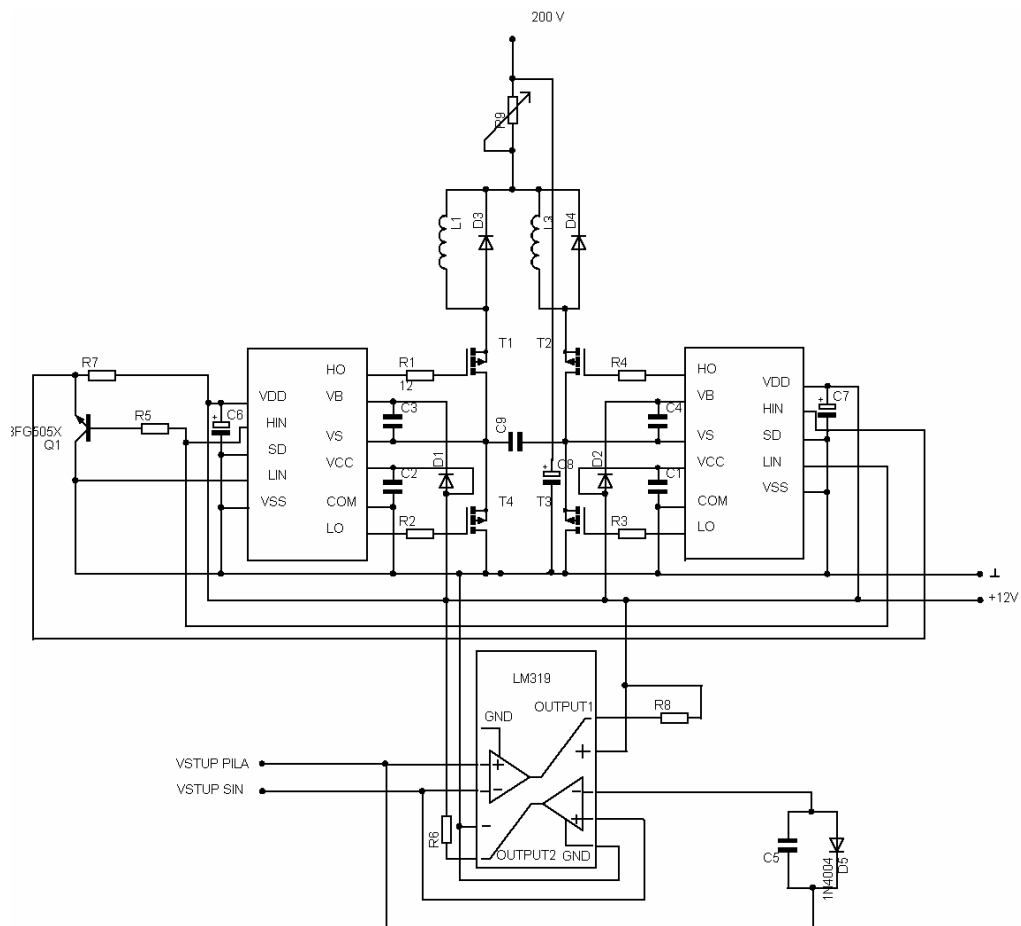
$$P_6 = U_2/R = 220^2 / 22,6 \cdot 10^3 = 2,2 \text{ W} \quad (2.6)$$

2.2 Návrh střídače

Ukázky zkoušených proudových zdrojů v celkovém zapojení H - můstku.



Obr. 26 Proudový střídač tvořený potenciometrem R14 a diodou D3



Obr. 27 Proudový střídač tvořen cívkami L1 a L2 a diodami D3,D4

Funkce obou těchto zapojení je vysvětleno v kapitole Proudové střídače.

2.3 Metoda měření

2.3.1 Měření na náhradní zátěži

Měřením na náhradní zátěži v našem případě znamená, měření na kondenzátoru v kombinaci měnící se hodnoty odporu. Jak je ukázáno na obrázku č. 17.

Neboť i piezomotor se chová jako kapacitní zátěž, proto je vybrán kondenzátor. Měřeno bylo celkem šest průběhů, přičemž se měnili hodnoty nosného a modulačního signálu. A jak už bylo řečeno i změna hodnoty zařazeného odporu. Naměřené a spočtené hodnoty napětí jsou zaneseny do tabulek 1 – 6.

První měření na kapacitoru v kombinaci s paralelní kombinací tří odporů o hodnotách 10 k Ω :

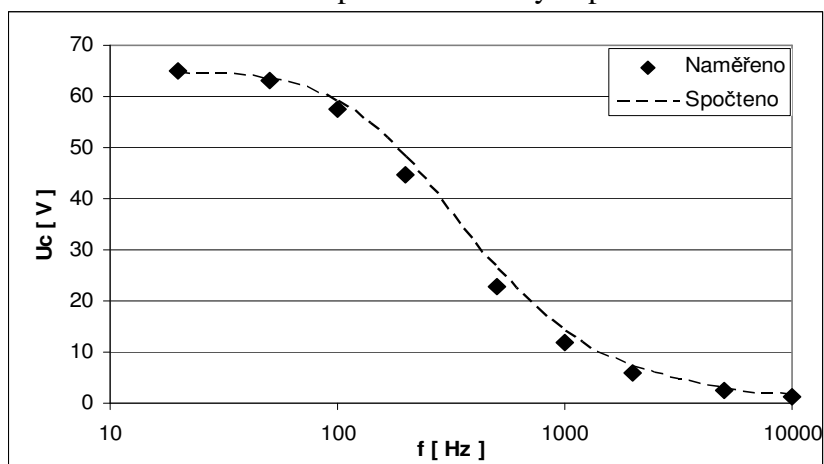
$$f_N = 60 \text{ kHz}$$

$$R = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$C = 220 \text{ nF}$$

f_M [Hz]	U_{C_N} [V]	U_{C_S} [V]
20	65,0	64,7
50	63,0	63,4
100	57,5	59,1
200	44,6	48,0
500	22,9	26,1
1000	12,0	13,9
2000	6,0	7,10
5000	2,45	2,84
10000	1,33	1,42

Tabulka 1 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru



Obr. 26. Průběh napětí na kondenzátoru

Druhé měření na stejných hodnotách kondenzátoru a odporu ,ale jiné hodnoty frekvence nosného signálu:

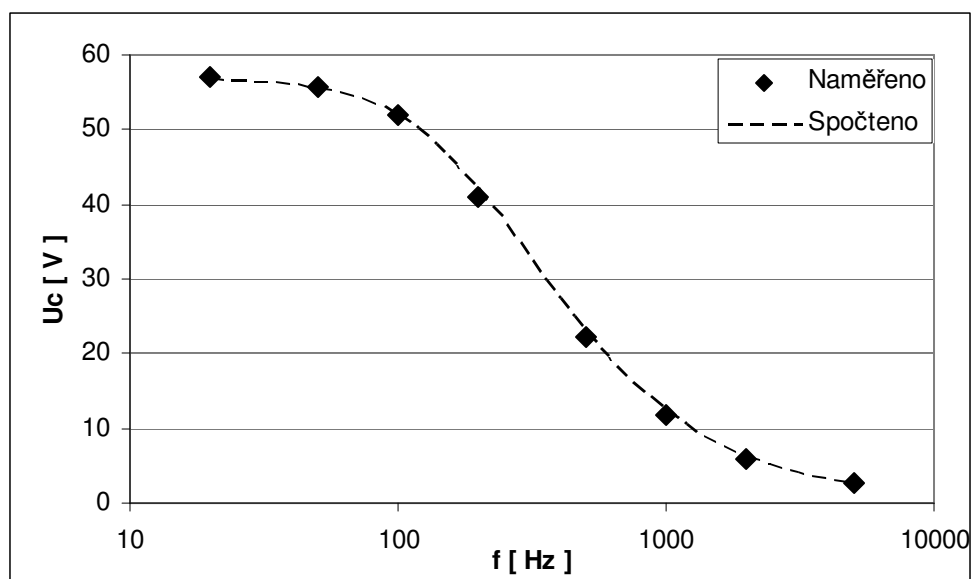
$$f_N = 20 \text{ kHz}$$

$$R = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$C = 220 \text{ nF}$$

$f_M [\text{Hz}]$	$U_{C_N} [\text{V}]$	$U_{C_S} [\text{V}]$
20	57,0	56,7
50	55,8	55,6
100	52,0	51,8
200	41,0	42,1
500	22,1	22,9
1000	11,7	12,2
2000	5,90	6,20
5000	2,60	2,50

Tabulka 2 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru



Obr. 27. Průběh napětí na kondenzátoru

Třetí měření je opět stejná hodnota kondenzátoru ,ovšem v kombinaci s jinou hodnotu odporu.

Jenž nyní je dána paralelní kombinací pěti odporů o hodnotách 3 x 10 k Ω a 2 x 6k8

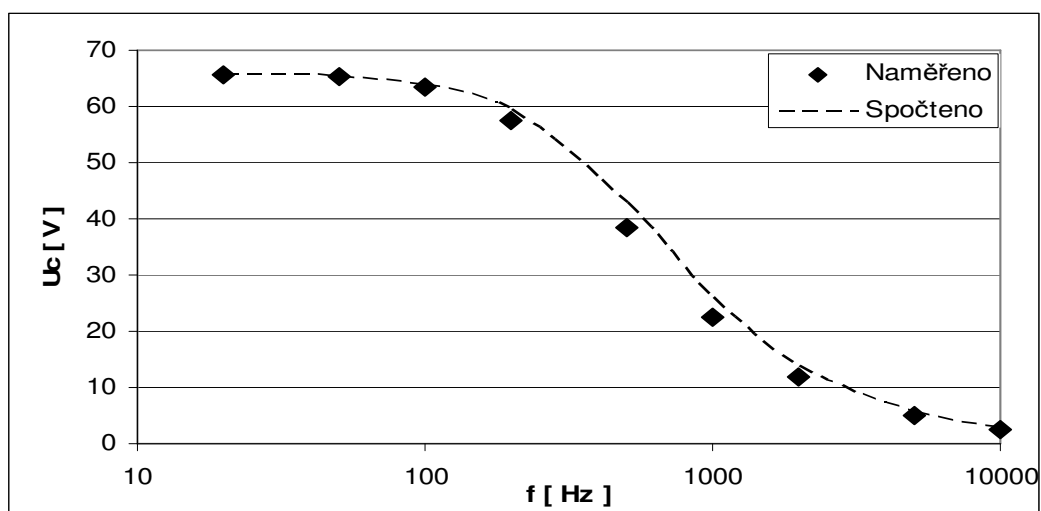
$f_N = 60 \text{ kHz}$

$R = 1,68 \text{ k}\Omega$

$C = 220 \text{ nF}$

$f_M [\text{Hz}]$	$U_{C_N} [\text{V}]$	$U_{C_S} [\text{V}]$
20	65,6	65,5
50	65,3	65,2
100	63,5	63,9
200	57,5	59,5
500	38,5	42,8
1000	22,4	25,9
2000	11,8	13,8
5000	4,90	5,60
10000	2,60	2,80

Tabulka 3 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru



Obr. 28. Průběh napětí na kondenzátoru

Čtvrté měření stejná hodnota kondenzátoru a odporu. Jiná hodnota frekvence nosného signálu.

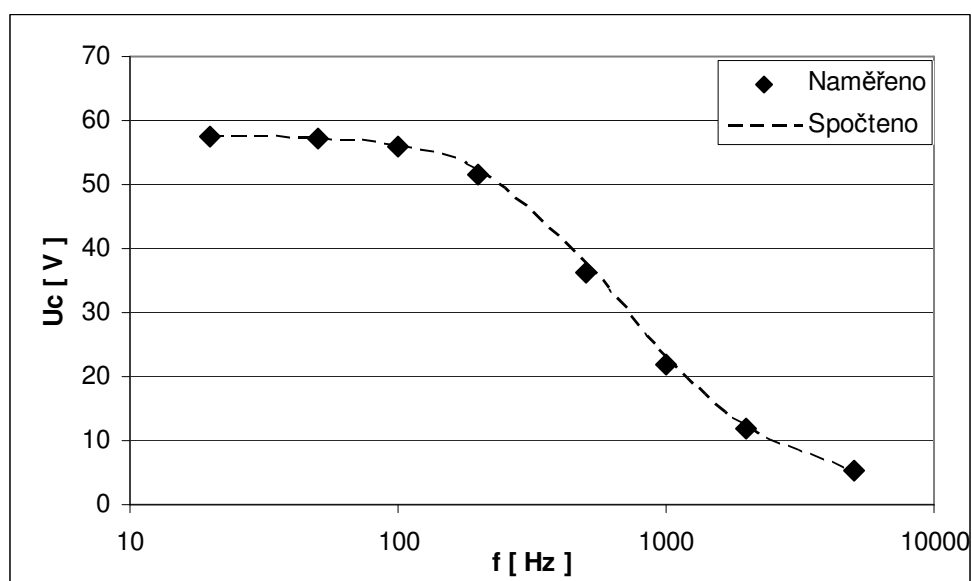
$f_N = 20 \text{ kHz}$

$R = 1,68 \text{ k}\Omega$

$C = 220 \text{ nF}$

$f_M [\text{Hz}]$	$U_{C_N} [\text{V}]$	$U_{C_S} [\text{V}]$
20	57,5	57,4
50	57,2	57,1
100	56,0	56,0
200	51,6	52,1
500	36,4	37,5
1000	21,8	22,7
2000	11,8	12,1
5000	5,20	4,90

Tabulka 4 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru



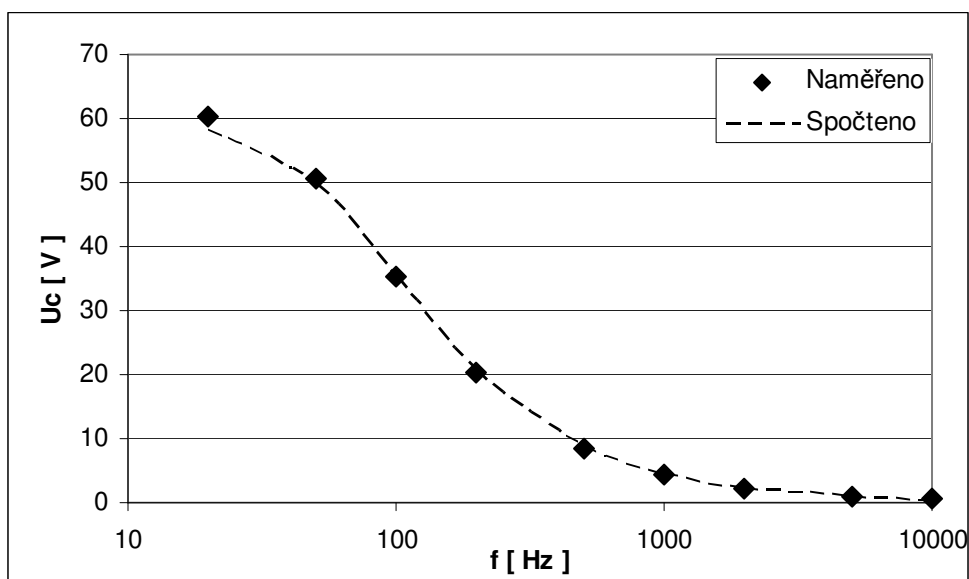
Obr. 29. Průběh napětí na kondenzátoru

Páté měření je pouze kombinace jediného odporu a kondenzátoru o hodnotách:

$f_N = 60 \text{ kHz}$
 $R = 10 \text{ k}\Omega$
 $C = 220 \text{ nF}$

$f_M [\text{Hz}]$	$U_{C_N} [\text{V}]$	$U_{C_S} [\text{V}]$
20	60,3	58,1
50	50,5	49,6
100	35,3	35,3
200	20,3	20,5
500	8,50	8,60
1000	4,40	4,40
2000	2,30	2,25
5000	1,07	0,872
10000	0,68	0,436

Tabulka 5 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru



Obr. 30. Průběh napětí na kondenzátoru

Šesté měření opět stejné pouze jiná hodnota frekvence nosného signálu:

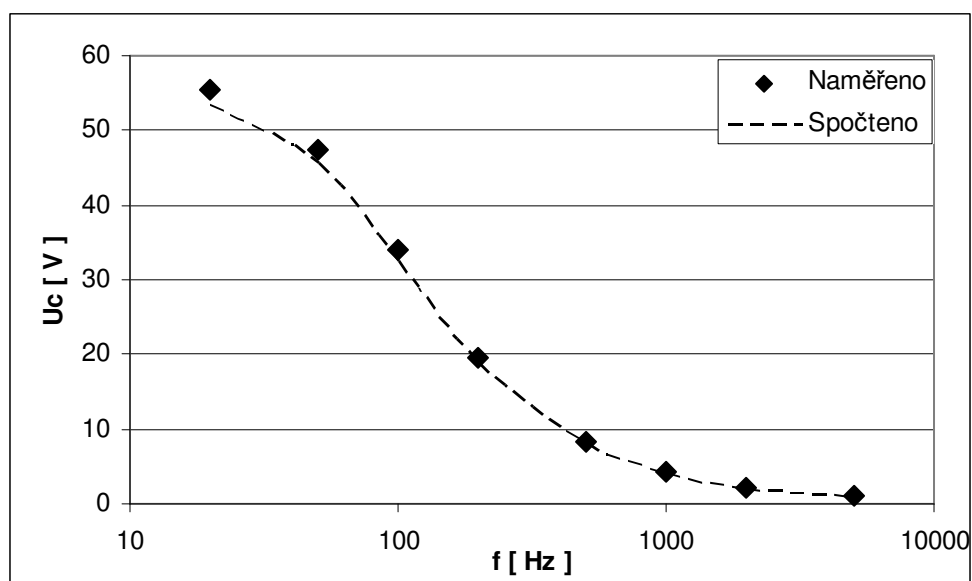
$f_N = 20 \text{ kHz}$

$R = 10 \text{ k}\Omega$

$C = 220 \text{ nF}$

$f_M [\text{Hz}]$	$U_{C_N} [\text{V}]$	$U_{C_S} [\text{V}]$
20	55,4	53,4
50	47,5	45,5
100	34,0	32,5
200	19,5	18,8
500	8,30	7,90
1000	4,29	4,00
2000	2,27	2,00
5000	1,12	0,801

Tabulka 6 Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru

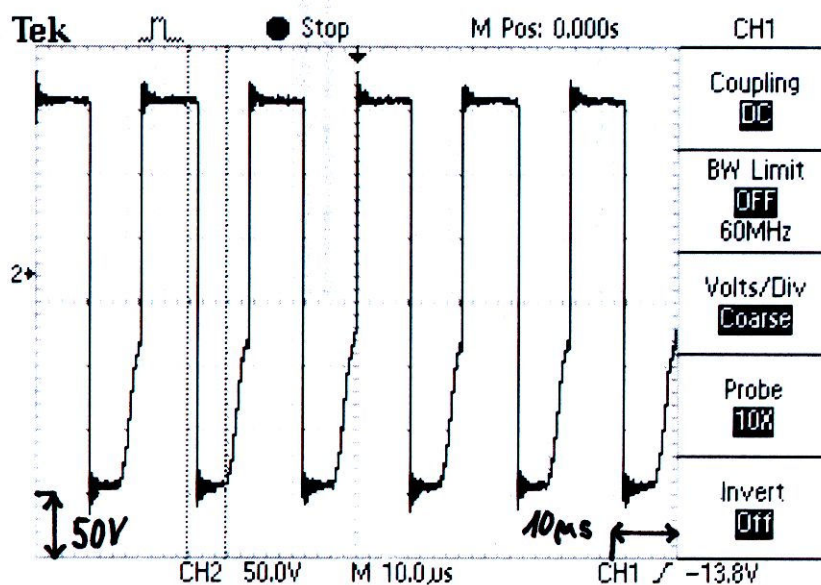


Obr. 31. Průběh napětí na kondenzátoru

Jak už bylo řečeno v kapitole Metoda měření lepší než přidat odpor je dobré použít rezonanční střídač. Bohužel z nedostatku času se tato metoda nevyzkoušela.

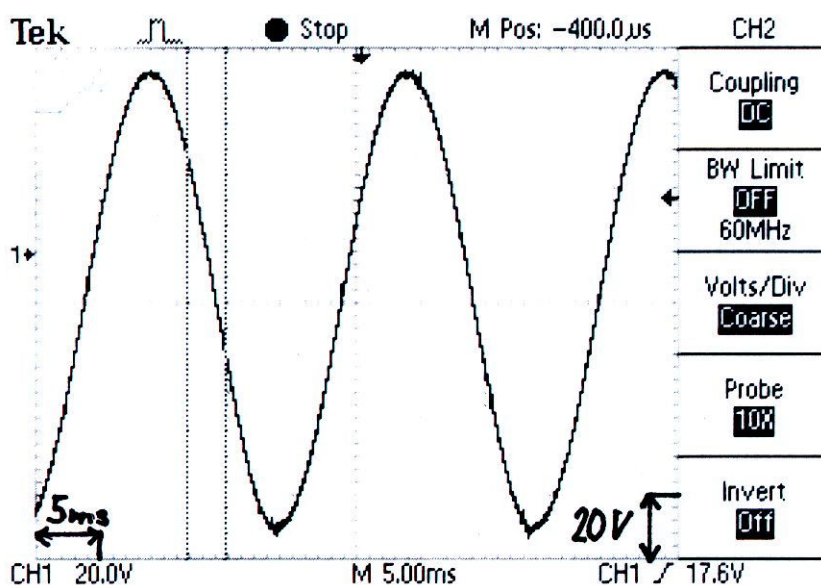
2.3.2 Ukázka průběhů získaných z osciloskopu

Na prvním obrázku vidíme průběh proudu na odporu $R1 = 10\text{ k}\Omega$



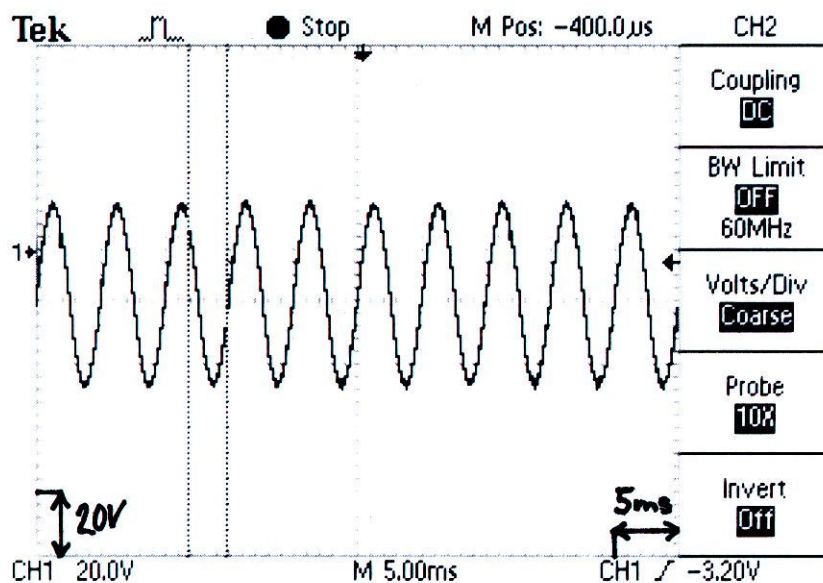
Obr. 32. Průběh proudu na odporu $R1$

Na druhém průběh napětí na odporu $R1 = 10\text{ k}\Omega$ a frekvencí $f = 50\text{ Hz}$



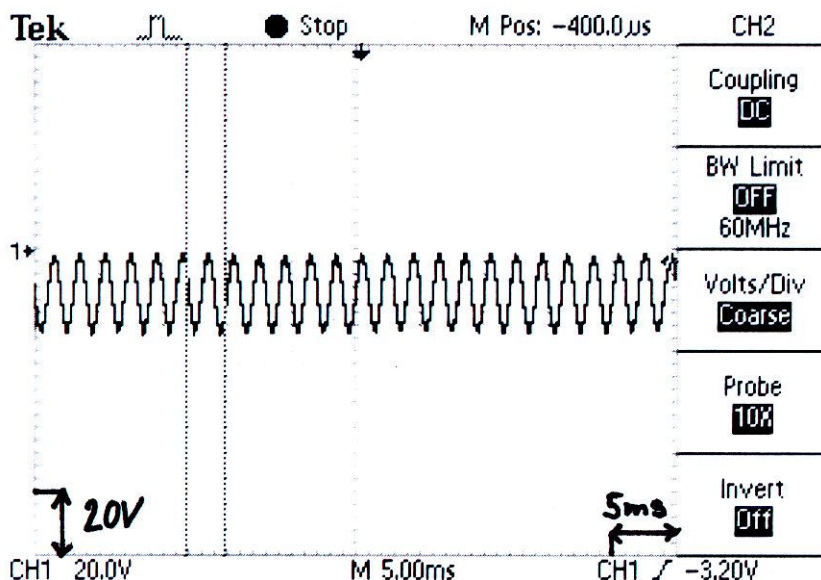
Obr. 33. Průběh napětí na odporu $R1$

Na třetím je opět znázorněno napětí na odporu $R1 = 10\text{ k}\Omega$, ale o frekvenci $f = 200\text{ Hz}$



Obr. 34. Průběh napětí na odporu R1

Na čtvrtém obrázku máme opět napětí na odporu $R1 = 10\text{ k}\Omega$, opět o jiné frekvenci $f = 500\text{ Hz}$



Obr. 35. Průběh napětí na odporu R1

Na těchto třech obrázcích vidíme jak se zvětšující se frekvencí, klesá amplituda signálu.

Na pátém obrázku je zobrazen průběh řízení dolní tranzistoru v můstku.

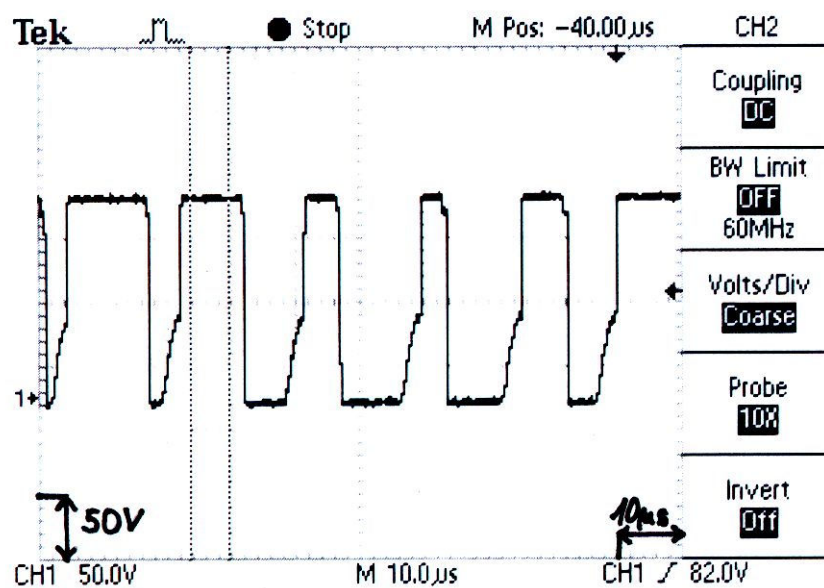
Kde frekvence je rovna $f = 10 \text{ kHz}$



Obr. 36. Průběh řízení dolního tranzistoru

.Na šestém obrázku je zobrazen průběh řízení horního tranzistoru

Při frekvenci $f = 10 \text{ kHz}$.



Obr. 37. Průběh řízení horního tranzistoru

3 Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh budiče pro piezoelektrické motory. Za tímto účelem byly navrženy a zhotoveny dva proudové střídače. Bohužel při proudovém buzení nevycházel takový signál, aby bylo možné můstek řídit. Proto se dospělo k závěru, že budiče IR 2112 nejsou vhodné pro proudové buzení. Přešlo se tedy na napěťové řízení, které je pro budiče IR 2112 vhodnější.

Vzhledem k tomu, že doba strávená na realizaci napájecího zdroje, který se nakonec nepodařilo dovést do funkční podoby, nebudil se zmiňovaný piezomotor, ale pouze byl zařazen kondenzátor. Důvodem nefunkčnosti napájecího zdroje byla problematika s integrovaným obvodem MAA 723. Proto se můstek napájel pevným napětím 150 V namísto požadovaného rozsahu 80 – 220 V.

Jelikož i piezomotor má kapacitní charakter, tak zvolená varianta není nevhodná. Z důvodu velkých hodnot středního proudu, který roste lineárně s frekvencí je nutné tento proud omezit. Proto se zařadil ke kondenzátoru odpor. Na této kombinaci se potom odehrávají všechna měření, která jsou následně vyhodnocena a porovnána s hodnotami spočtenými. Jak je zobrazeno v tabulkách a grafech.

Lze použít pro zamezení těchto vysokých proudů rezonančních střídačů. Ovšem s použitím tohoto střídače klesá využití modulační frekvence signálu.

Tato práce je zatím takovým úvodem do problematiky buzení piezoelektrických motorů. Na kterém bych rád pokračoval v navazujícím magisterském studiu.

4 Seznam použité literatury

- [1] Kůs, V. : Elektrické pohony a výkonová elektronika. ZU – FEL Plzeň 2005.
- [2] Krejčířík, A. : Napájecí zdroje I. BEN, Praha 1996.
- [3] Rydlo, P. , Richter, A. : Piezoelektrické motory. AUTOMA č. 9 2000 str. 9 – 12.
- [4] Učební texty k předmětu RACX, TUL – FM.
- [5] Firemní materiály firem International Rectifier, SGS - Thompson

5 Seznam obrázků

OBR. 1. DEFORMACE VLIVEM PŘILOŽENÉHO NAPĚTÍ [3]	3
OBR. 2. STRUKTURA PIEZOELEKTRICKÉHO MĚNIČE [3]	2
OBR. 3. ZOBRAZENÍ VZNIKU POSTUPNÉ ELASTICKÉ VLNY [3]	3
OBR. 4. ZNÁZORNĚNÍ VZNIKU ELIPTICKÉHO POHYBU BODU B NA POVRCHU ELASTICKÉ VRSTVY [3]	4
OBR. 5. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ PIEZOELEKTRICKÉHO MOTORU [3]	4
OBR. 6. ROZVINUTÝ PRSTENEC STATORU PIEZOELEKTRICKÉHO MOTORU [3]	5
OBR. 7. PRSTEN STATORU PIEZOELEKTRICKÉHO MOTORU [3]	5
OBR. 8. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ PIEZOELEKTRICKÉHO MOTORU [3]	2
OBR. 9. PROUDOVÝ ZDROJ	2
OBR. 10. PROUDOVÝ ZDROJ	4
OBR. 11. ZAPOJENÍ STŘÍDAČE V JEDNOFÁZOVÉM POLOMŮSTKOVÉM SPOJENÍ [1]	4
OBR. 12. JEDNOFÁZOVÉ MŮSTKOVÉ SPOJENÍ [1]	5
OBR. 13. KOMPARÁTOR [4]	2
OBR. 14. ČTYŘKVADRANTOVÝ CELÝ MŮSTEK [4]	3
OBR. 15. ŘÍDÍCÍ SYSTÉM KE ČTYŘKVADRANTOVÉMU MŮSTKU [4]	3
OBR. 17. H – MŮSTEK SE ZAŘAZENÝM ODPOREM K ZÁTĚŽI	6
OBR. 19. MŮSTEK SE SEPNUÝMI TRANZISTORY 1 A 3	6
OBR. 18. NAMODELOVANÝ SIGNÁL NABÍJECÍHO KONDENZÁTORU	7
OBR. 20. MŮSTEK SE SEPNUÝMI TRANZISTORY 2 A 4	7
OBR. 21. NAMODELOVANÝ SIGNÁL VYBÍJECÍHO SE KONDENZÁTORU	7
OBR. 22. PWM S NAMODELOVANÝM SIGNÁLEM	8
OBR. 23. REZONANČNÍ STŘÍDAČ	8
OBR. 24. BLOKOVÉ SCHÉMA IR 2112	10
OBR. 25. NAPÁJECÍ ZDROJ S INTEGROVANÝM STABILIZÁTOREM MAA 723 [3]	2
OBR. 26. PROUDOVÝ STŘÍDAČ TVOŘENÝ POTENCIOMETREM R14 A DIODOU D3	2
OBR. 27. PROUDOVÝ STŘÍDAČ TVOŘEN CÍVKAMI L1 A L2 A DIODAMI D3, D4	3
OBR. 26. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	4
OBR. 27. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	5
OBR. 28. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	6
OBR. 29. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	2
OBR. 30. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	3
OBR. 31. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONDENZÁTORU	4
OBR. 32. PRŮBĚH PROUDU NA ODPORU R1	5
OBR. 33. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA ODPORU R1	5
OBR. 34. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA ODPORU R1	6
OBR. 35. PRŮBĚH NAPĚTÍ NA ODPORU R1	6
OBR. 36. PRŮBĚH ŘÍZENÍ DOLNÍHO TRANZISTORU	7
OBR. 37. PRŮBĚH ŘÍZENÍ HORNÍHO TRANZISTORU	7

6 Seznam tabulek

Tabulka 1	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	4
Tabulka 2	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	5
Tabulka 3	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	6
Tabulka 4	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	2
Tabulka 5	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	3
Tabulka 6	Naměřené a spočtené hodnoty napětí na kondenzátoru.....	4